

(51) Int.Cl.⁵

識別記号

F I

G 0 2 F 1/37

G 0 2 F 1/37

G 0 2 B 27/09

H 0 1 S 3/16

H 0 1 S 3/094

G 0 2 B 27/00

E

3/16

H 0 1 S 3/094

S

審査請求 未請求 請求項の数9 F D (全 12 頁)

(21) 出願番号

特願平9-165029

(22) 出願日

平成9年(1997)6月6日

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 大槻 朋子

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72) 発明者 大和 壮一

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72) 発明者 原田 昌樹

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

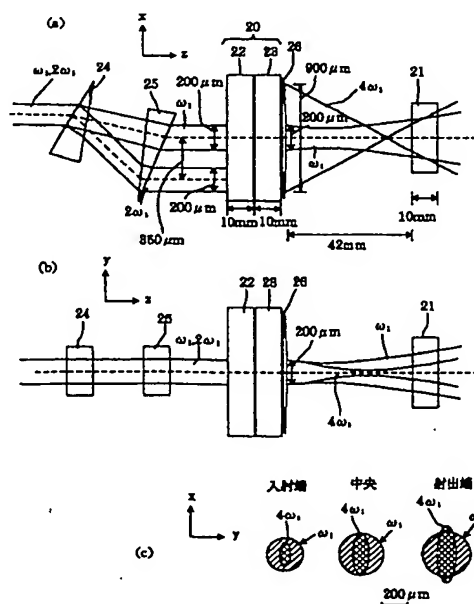
(74) 代理人 弁理士 山口 孝雄

(54) 【発明の名称】 波長変換装置および該波長変換装置を用いた紫外レーザー装置

(57) 【要約】

【課題】 基本波として高ピーク出力のレーザー光を必要とすることなく、波長変換効率が高く且つコンパクトな構成を有する波長変換装置。

【解決手段】 第2の非線形光学結晶(21)における周波数 ω_1 のレーザー光のビーム中心位置と周波数 $2\omega_2$ ($4\omega_1$)のレーザー光のビーム中心位置とを共通の光学素子を用いてほぼ一致させるためのビーム中心位置調節手段(24、25)と、第2の非線形光学結晶(21)における周波数 ω_1 のレーザー光のビーム形状と周波数 $2\omega_2$ ($4\omega_1$)のレーザー光のビーム形状とを共通の光学素子を用いて整合させるためのビーム形状整合手段(26)とを備えている。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 複屈折性を有する第1の非線形光学結晶を有し、該第1の非線形光学結晶に入射した周波数 ω_1 のレーザ光をその周波数を変化させることなく透過させて射出するとともに、前記第1の非線形光学結晶に常光として入射した周波数 ω_2 のレーザ光に基づいてビーム形状が所定方向に延びた周波数 $2\omega_2$ の異常光を発生させて射出する第二高調波発生手段と、

複屈折性を有する第2の非線形光学結晶を有し、前記第1の非線形光学結晶を介して前記第2の非線形光学結晶に入射した周波数 ω_1 のレーザ光と、前記第1の非線形光学結晶を介して前記第2の非線形光学結晶に入射した周波数 $2\omega_2$ のレーザ光とに基づいて、周波数 $(\omega_1 + 2\omega_2)$ のレーザ光を発生させて射出する和周波発生手段と、

前記第2の非線形光学結晶における前記周波数 ω_1 のレーザ光のビーム中心位置と前記周波数 $2\omega_2$ のレーザ光のビーム中心位置とを共通の光学素子を用いてほぼ一致させるためのビーム中心位置調節手段と、

前記第2の非線形光学結晶における前記周波数 ω_1 のレーザ光のビーム形状と前記周波数 $2\omega_2$ のレーザ光のビーム形状とを共通の光学素子を用いて整合させるためのビーム形状整合手段と、

を備えていることを特徴とする波長変換装置。

【請求項2】 前記ビーム中心位置調節手段は、前記第二高調波発生手段の入射側の光路中または前記第二高調波発生手段と前記和周波発生手段との間の光路中に配置された平行平板を有することを特徴とする請求項1に記載の波長変換装置。

【請求項3】 前記ビーム中心位置調節手段は、前記第二高調波発生手段の入射側の光路中または前記第二高調波発生手段と前記和周波発生手段との間の光路中に配置された一对のプリズムを有することを特徴とする請求項1に記載の波長変換装置。

【請求項4】 前記ビーム形状整合手段は、前記第二高調波発生手段と前記和周波発生手段との間の光路中に配置されたレンズを有することを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項に記載の波長変換装置。

【請求項5】 前記レンズは、その光軸を含んで直交する2つの面内において互いに異なる屈折力を有することを特徴とする請求項4に記載の波長変換装置。

【請求項6】 前記ビーム中心位置調節手段および前記ビーム形状整合手段は、前記第二高調波発生手段と前記和周波発生手段との間の光路中に配置された一对の回折光学素子を有し、各回折光学素子の焦点距離は入射光の周波数に比例することを特徴とする請求項1に記載の波長変換装置。

【請求項7】 複屈折性を有する第3の非線形光学結晶を有し、該第3の非線形光学結晶に入射した周波数 ω_1 のレーザ光に基づいて周波数 $2\omega_1$ のレーザ光を発生さ

せて射出する第2の第二高調波発生手段をさらに備え、前記第2の第二高調波発生手段は、前記周波数 $2\omega_1$ のレーザ光を前記周波数 ω_2 のレーザ光として前記周波数 ω_1 のレーザ光と同じ光路に沿って射出することを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項に記載の波長変換装置。

【請求項8】 請求項1乃至7のいずれか1項に記載の波長変換装置と、該波長変換装置に所定の周波数を有するレーザ光を供給するためのレーザ装置とを有するレーザユニットを並列的に複数配置することによって構成され、各レーザユニットは前記レーザ装置からのレーザ光を前記波長変換装置において紫外レーザ光に波長変換して射出することを特徴とする紫外レーザ装置。

【請求項9】 前記レーザ装置は、Ndをドープした固体レーザ媒質を半導体レーザで光励起することによってレーザ発振する半導体レーザ励起固体レーザ装置であり、

前記波長変換装置は、前記半導体レーザ励起固体レーザ装置からの近赤外レーザ光をその5倍波の紫外レーザ光に波長変換することを特徴とする請求項8に記載の紫外レーザ装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は波長変換装置および該波長変換装置を用いた紫外レーザ装置に関し、特に複屈折性を有する非線形光学結晶を用いて近赤外光、可視光、紫外光をより短波長の紫外光に波長変換する装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】 半導体製造工程で使用される露光機をはじめとするマイクロマシニングの分野では、たとえばNd:YAG(NdをドープしたYttrium Aluminum Garnet)をレーザ媒質とする固体レーザ(以下、単に「Nd:YAGレーザ」という)からの基本波(1064nm)を波長変換して得られた5倍波(213nm)を用いる紫外光源の応用が注目されている。一般に、Nd:YAGレーザの基本波から5倍波への波長変換を行う従来の波長変換装置では、2倍波発生部において第二高調波発生素子としての非線形光学結晶LiBO(LiB₃O₅)等を用いて、基本波から2倍波を発生させる。次いで、4倍波発生部において第二高調波発生素子としての非線形光学結晶BBO(β -BaB₂O₄)を用いて、2倍波から4倍波を発生させる。最後に、5倍波発生部において和周波発生素子としての非線形光学結晶BBOを用いて、基本波と4倍波とから5倍波を発生させる。

【0003】 図9は、従来の波長変換装置の4倍波発生部を構成する非線形光学結晶BBOにおける4倍波発振の様子を示す図であって、(a)は各レーザ光がBBO結晶を伝播する様子を、(b)はBBO結晶の射出端における各レーザ光のビーム位置およびビーム形状をそれ

それぞれ示している。図9に示す波長変換装置の4倍波発生部では、Nd:YAGレーザの基本波（すなわち周波数 ω_1 のレーザ光）と2倍波（すなわち周波数 $2\omega_1$ のレーザ光）とが同じ光路に沿って（同軸で）複屈折性の強いBBO結晶90に入射する。そして、BBO結晶90において、常光として入射した2倍波から異常光である4倍波（すなわち周波数 $4\omega_1$ のレーザ光）が発生する。

【0004】すなわち、図9(a)に示すように、異常光である4倍波は、常光である2倍波のビーム中心軸線上の各発生箇所から所定方向に所定のウォークオフ角度（Walk off angle）をもってBBO結晶90の中を伝播する。なお、異常光が常光のビーム中心軸線上の各発生箇所から所定方向に所定の角度をもって非線形光学結晶中を伝播する現象をウォークオフ（Walk off）という。その結果、図9(b)に示すように、BBO結晶90の射出端において、4倍波のビーム形状はウォークオフの方向に延びた細長いビーム形となり、4倍波のビーム中心と2倍波のビーム中心とは一致しない。なお、異常光として入射した基本波もBBO結晶90において複屈折の影響を受け、そのビーム中心軸線は2倍波のビーム中心軸線から複屈折角の方向にずれるが、そのビーム形状は不変である。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】 上述のように構成された従来の波長変換装置では、4倍波発生部を構成するBBO結晶におけるウォークオフの影響により、2倍波と4倍波とのビームの重なりが低下して4倍波発生効率低下するばかりでなく、後段の5倍波発生部を構成するBBO結晶において基本波と4倍波とのビームの重なりが低下して5倍波発生効率低下する。すなわち、4倍波発生部における4倍波のウォークオフに起因して、波長変換装置の波長変換効率が低下する。

【0006】 上述の4倍波発生部における4倍波のウォークオフの影響を補償して波長変換効率を向上させるには、結晶軸を反転させた一対のBBO結晶を光の進行方向に沿って直列に配置して4倍波発生部を構成する方法が考えられる。図10は、従来の波長変換装置において結晶軸を反転させた一対のBBO結晶を直列配置して4倍波発生部を構成した様子を示す図であって、(a)は各レーザ光が一対のBBO結晶を伝播する様子、

(b)は後段のBBO結晶の射出端における各レーザ光のビーム位置およびビーム形状をそれぞれ示している。

【0007】 図10(a)に示すように、前段のBBO結晶91においては、図9のBBO結晶90と同様に、4倍波（周波数 $4\omega_1$ ）は2倍波（周波数 $2\omega_1$ ）のビーム中心軸線上の各発生箇所から図中下方に所定のウォークオフ角度をもって伝播する。一方、後段のBBO結晶92においては、4倍波は2倍波のビーム中心軸線上の各発生箇所から図中上方に所定のウォークオフ角度を

もって伝播する。その結果、4倍波発生部における2倍波と4倍波とのビームの重なりが向上して4倍波発生効率向上する。しかしながら、図10(b)に示すように、後段のBBO結晶92の射出端において、4倍波のビーム形状は所定方向に延びた細長いビーム形となり、4倍波のビーム中心と2倍波のビーム中心とは一致しない。その結果、5倍波発生部を構成するBBO結晶93における基本波（周波数 ω_1 ）と4倍波とのビームの重なりは向上することなく、したがって5倍波発生効率は改善されない。

【0008】 5倍波発生部における基本波と4倍波とのビームの重なりを向上させて5倍波発生効率を改善するには、次の2つの方法が考えられる。第1の方法では、ウォークオフの影響による4倍波のビーム形状の拡がり問題にならないような大きなビーム形状を使用する。即ち、4倍波発生部に同軸に入射する基本波および2倍波のビーム形状を、すなわち図示を省略した2倍波発生部に入射する基本波のビーム形状を大きく設定する。第2の方法では、5倍波発生部に入射する基本波の光路と4倍波の光路とを空間的に分離し、各光路にそれぞれ配置された光学系を介して5倍波発生部を構成する非線形光学結晶における基本波と4倍波とのビームの重なりを向上させる。

【0009】 しかしながら、第1の方法によれば、5倍波発生部に入射する基本波のビーム径を小さく設定することができない。このため、5倍波発生部の非線形光学結晶において良好な変換効率を得るのに必要な高いパワー密度を基本波が確保することができない。換言すれば、5倍波発生部において良好な変換効率を得るには、非常に高ピーク出力のレーザが必要となってしまう。一方、第2の方法によれば、基本波と4倍波とのビームの重なりを独立した2つの光学系を介して調整することが煩雑なばかりでなく、2倍波発生部と4倍波発生部と5倍波発生部とを一直線に沿って直列に配置するコンパクトな構成を採用することができなくなってしまう。

【0010】 本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、基本波として高ピーク出力のレーザ光を必要とすることなく、波長変換効率が高く且つコンパクトな構成を有する波長変換装置を提供することを目的とする。また、本発明の波長変換装置を用いて、たとえば半導体露光装置の光源として十分な出力と低コヒーレンスとを備えた紫外レーザ装置を提供することを目的とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】 前記課題を解決するために、本発明においては、複屈折性を有する第1の非線形光学結晶を有し、該第1の非線形光学結晶に入射した周波数 ω_1 のレーザ光をその周波数を変化させることなく透過させて射出するとともに、前記第1の非線形光学結晶に常光として入射した周波数 ω_2 のレーザ光に基づい

てビーム形状が所定方向に延びた周波数 ω_2 の異常光を発生させて射出する第二高調波発生手段と、複屈折性を有する第2の非線形光学結晶を有し、前記第1の非線形光学結晶を介して前記第2の非線形光学結晶に入射した周波数 ω_1 のレーザ光と、前記第1の非線形光学結晶を介して前記第2の非線形光学結晶に入射した周波数 $2\omega_2$ のレーザ光とに基づいて、周波数 $(\omega_1 + 2\omega_2)$ のレーザ光を発生させて射出する和周波発生手段と、前記第2の非線形光学結晶における前記周波数 ω_1 のレーザ光のビーム中心位置と前記周波数 $2\omega_2$ のレーザ光のビーム中心位置とを共通の光学素子を用いてほぼ一致させるためのビーム中心位置調節手段と、前記第2の非線形光学結晶における前記周波数 ω_1 のレーザ光のビーム形状と前記周波数 $2\omega_2$ のレーザ光のビーム形状とを共通の光学素子を用いて整合させるためのビーム形状整合手段と、を備えていることを特徴とする波長変換装置を提供する。

【0012】本発明の好ましい態様によれば、前記ビーム中心位置調節手段は、前記第二高調波発生手段の入射側の光路中または前記第二高調波発生手段と前記和周波発生手段との間の光路中に配置された平行平板または一对のプリズムを有する。また、前記ビーム形状整合手段は、前記第二高調波発生手段と前記和周波発生手段との間の光路中に配置されたレンズを有することが好ましい。この場合、前記レンズは、その光軸を含んで直交する面内において互いに異なる屈折力を有することがさらに好ましい。

【0013】また、本発明の別の局面によれば、本発明の波長変換装置と、該波長変換装置に所定の周波数を有するレーザ光を供給するためのレーザ装置とを有するレーザユニットを並列的に複数配置することによって構成され、各レーザユニットは前記レーザ装置からのレーザ光を前記波長変換装置において紫外レーザ光に波長変換して射出することを特徴とする紫外レーザ装置を提供する。この場合、前記レーザ装置は、Ndをドープした固体レーザ媒質を半導体レーザで光励起することによってレーザ発振する半導体レーザ励起固体レーザ装置であり、前記波長変換装置は、前記半導体レーザ励起固体レーザ装置からの近赤外レーザ光をその5倍波の紫外レーザ光に波長変換することが好ましい。

【0014】

【発明の実施の形態】図1は、本発明の波長変換装置の作用を説明するための図であって、(a)は各レーザ光が装置を伝播する様子を、(b)は4倍波発生部の射出端における基本波と4倍波との重なりを、(c)は5倍波発生部のBBO結晶における基本波と4倍波との重なりをそれぞれ示している。

【0015】本発明の波長変換装置の具体的な構成例において、第二高調波発生手段の前段には、2倍波発生部

たとえば非線形光学結晶LBOを用いて、Nd:YAGレーザの基本波(周波数 ω_1)から2倍波(周波数 $2\omega_1$)を発生させる。第二高調波発生手段は4倍波発生部であり、たとえば結晶軸を反転させた一对の非線形光学結晶BBOを用いて、2倍波から4倍波(周波数 $4\omega_1$)を発生させる。第二高調波発生手段の後段には、5倍波発生部としての和周波発生手段が設けられている。5倍波発生部は、たとえば非線形光学結晶BBOを用いて、基本波と4倍波とから5倍波(周波数 5ω)を発生させる。

【0016】本発明では、図1に示す具体的な構成において、たとえば平行平板または一对のプリズムからなるビーム中心位置調節部が、2倍波発生部と4倍波発生部との間の光路中または4倍波発生部と5倍波発生部との間の光路中に配置されている。そして、このビーム中心位置調節部の作用により、5倍波発生部の非線形光学結晶BBOにおける基本波のビーム中心位置と4倍波のビーム中心位置とをほぼ一致させる。また、たとえばレンズからなるビーム形状整合部が、4倍波発生部と5倍波発生部との間の光路中に配置されている。そして、このビーム形状整合部の作用により、5倍波発生部の非線形光学結晶BBOにおける基本波のビーム形状と4倍波のビーム形状とを整合させる。

【0017】したがって、図1(c)に示すように、基本波のビーム径を小さく設定しても、4倍波発生部のBBO結晶におけるウォークオフの影響を補償し、5倍波発生部のBBO結晶において基本波と4倍波との間に良好なビームの重なりを確保することができる。なお、上述のように、ビーム中心位置調節部およびビーム形状整合部は、基本波と4倍波とに対して別々の光学系を用いることなく共通の光学素子を用いている。したがって、ビーム中心位置調節部およびビーム形状整合部を、2倍波発生部、4倍波発生部および5倍波発生部とともに一直線状にコンパクトに配列することができる。こうして、本発明によれば、基本波として高ピーク出力のレーザ光を必要とすることなく、波長変換効率が高く且つコンパクトな構成を有する波長変換装置を実現することができる。

【0018】以下、本発明の実施例を、添付図面に基づいて説明する。図2は、本発明の第1実施例にかかる波長変換装置の構成を概略的に示す図である。図2において、波長変換装置に同軸で入射する基本波および2倍波のビーム中心軸線に平行にz軸を、z軸に垂直な面内において直交する方向にx軸およびy軸をそれぞれ設定している。したがって、(a)はxz平面に沿った装置の構成を、(b)はyz平面に沿った装置の構成を、

(c)は5倍波発生部のBBO結晶の入射端、中央および射出端における基本波と4倍波とのビームの重なりをそれぞれ示している。

【0019】第1実施例の装置は、4倍波発生部20

と、5倍波発生部21と、4倍波発生部20の前段に配置された2倍波発生部（不図示）とを備えている。2倍波発生部は、第二高調波発生素子としてのLBO結晶を用いて、たとえばNd:YAGレーザから供給された基本波（波長1064nm:周波数 ω_1 ）から2倍波（波長532nm:周波数 $2\omega_1$ ）を発生させる第二高調波発生手段を構成している。4倍波発生部20は、第二高調波発生素子としての一对のBBO結晶22および23を用いて、2倍波から4倍波（波長266nm:周波数 $4\omega_1$ ）を発生させる第二高調波発生手段を構成している。なお、一对のBBO結晶22および23は、結晶軸が互いに反転するように入射ビームの中心軸線に沿って（z軸に沿って）直列に配置されている。5倍波発生部21は、和周波発生素子としてのBBO結晶21を用いて、基本波と4倍波とから5倍波（波長213nm:周波数 $5\omega_1$ ）を発生させる和周波発生手段を構成している。図2(a)に示すように、各BBO結晶の厚さ（入射ビームの中心軸線に沿った長さ）は、ともに10mmである。

【0020】また、第1実施例の装置は、4倍波発生部20の入射側の光路中（2倍波発生部と4倍波発生部20との間の光路中）に配置された一对のプリズム24および25と、4倍波発生部20と5倍波発生部21との間の光路中に配置された球面レンズ26とを備えている。一对のプリズム24および25は、4倍波発生部20から基本波と4倍波とを同軸に射出させるために、2倍波発生部から同軸に入射した基本波および2倍波を互いに異なる距離だけx方向に平行移動させる作用を有し、後述するようにビーム中心位置調節手段を構成している。また、球面レンズ26は、4倍波発生部20から同軸に射出された基本波および4倍波を集光する作用を有し、後述するようにビーム形状整合手段を構成している。なお、図2(a)に示すように、2倍波発生部から同軸に供給される基本波および2倍波はともに、直径200 μ mの円形ビーム形状を有する。

【0021】図3は、第1実施例の4倍波発生部20におけるウォークオフの影響を説明するための図である。図3(a)を参照すると、2倍波発生部からの基本波と2倍波とが一对のプリズム24および25を介することなく結晶軸が反転された一对のBBO結晶22および23からなる4倍波発生部20に同軸に入射し、且つ4倍波発生部20からの基本波と2倍波とが球面レンズ26を介することなく5倍波発生部21に入射する様子が示されている。この場合、図10を参照してすでに説明したように、異常光である4倍波は、常光である2倍波のビーム中心軸線上の各発生箇所から4.9°のウォークオフ角度をもって一对のBBO結晶中を伝播する。また、異常光である基本波は、複屈折により3.9°の角度でBBO結晶22および23中を伝播するが、その方向はBBO結晶22と23とで互いに反対向きであるた

め、結果としてビーム中心位置はBBO結晶22への入射ビームと同一になり、またそのビーム形状は不変である。

【0022】したがって、図3(b)に示すように、4倍波発生部20の射出端および5倍波発生部21の入射端において、4倍波のビーム形状はウォークオフの影響を受けるx方向に900 μ mでウォークオフの影響を受けないy方向に200 μ mの細長い形状となる。一方、基本波のビーム形状はウォークオフの影響を受けることなく200 μ mの円形状のままであり、基本波の伝播方向すなわちビーム中心軸線方向に対する複屈折の影響は一对のBBO結晶22および23により相殺される。このように、第1実施例においてビーム中心位置調節手段およびビーム形状整合手段を介在させない場合には、4倍波発生部20におけるウォークオフの影響により、4倍波発生部20の射出端および5倍波発生部21の入射端で基本波のビーム中心と4倍波のビーム中心とはx方向に沿って350 μ mだけ離れてしまうことになる。

【0023】図4は、第1実施例においてビーム中心位置調節手段を構成する一对のプリズム24および25の作用を説明するための図である。図4に示すように、一对のプリズム24および25は、4倍波発生部20から基本波と4倍波とを同軸に射出させるために、2倍波発生部から同軸に入射した基本波および2倍波を互いに異なる距離だけx方向に平行移動させている。すなわち、4倍波発生部20に入射する基本波のビーム中心軸線と2倍波のビーム中心軸線とをx方向に沿って350 μ mだけ離れさせることによって、4倍波発生部20から基本波と4倍波とを同軸に射出させることを、ひいては5倍波発生部21に基本波と4倍波とを同軸に入射させることを可能にしている。このように、一对のプリズム24および25は、5倍波発生部21のBBO結晶における基本波のビーム中心位置と4倍波のビーム中心位置とをほぼ一致させるためのビーム中心位置調節手段を構成している。

【0024】以下、分散（色収差）の比較的大きい光学材料SF57を用いた場合の一对のプリズム24および25の具体的な構成について説明する。なお、光学材料SF57は、基本波（波長1064nm）に対して $n(\omega_1) = 1.81104$ の屈折率を有し、2倍波（波長532nm）に対して $n(2\omega_1) = 1.85850$ の屈折率を有する。一对のプリズム24および25では、この波長による屈折率の違い、すなわち光学材料の有する分散により、各プリズムへの入射角と射出角とがなす角すなわちプリズムの偏角がビームの波長（すなわち周波数 ω ）に依存して異なる。この偏角の違いによって、2つの入射ビームの相対位置を所望量だけずらせることができる。図4において、一对のプリズム24および25は、その対向面24aと25aとがほぼ平行でz方向に沿って距離Lだけ離れている。この場合、各プリ

ズムの頂角をAとし、プリズムへの入射角と射出角となす角すなわちプリズムの偏角をDとし、プリズムの光学材料の屈折率をnとすると、次の式(1)に示す関係が成立する。この式(1)は、プリズムの頂角Aが後述するように30°と小さな角度であり、プリズムへの入射が垂直入射に近い場合に近似的に成立する式である。

$$D=A(n-1) \quad (1)$$

【0025】したがって、距離Lだけ離れたところでのビーム中心位置変位Xは、次の式(2)で表される。

$$X=D \cdot L=L \cdot A(n-1) \quad (2)$$

すなわち、一对のプリズム24および25を形成する光学材料SF57の有する分散($dn(\omega)/d\omega$)により、入射ビームの波長に依存したビーム中心位置変位X(ω)が得られる。したがって、基本波(ω_1)と2倍波($2\omega_1$)との相対位置変位($X(2\omega_1)-X(\omega_1)$)

*1))を所要の値である350 μ mにするには、頂角A=30°の一对のプリズムを距離L=15mmだけ間隔を隔てて配置すればよいことになる。なお、頂角A=30°を変えることなく光学材料SF57よりもさらに分散の大きい光学材料を用いると、距離Lをさらに小さくすることができ、よりコンパクトな構成が可能となる。

【0026】図5は、第1実施例におけるビーム中心位置調節手段として平行平板を用いた変形例を説明するための図である。図5において、周波数 ω を有するビームに対する平行平板51の屈折率をn(ω)とし、平行平板51の厚さをtとし、平行平板51へのビームの入射角をIとすると、入射ビームの変位X(ω)は次の式(3)で表される。

【数1】

$$X(\omega) = t \sin(I) \left[1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2(I)}{n(\omega)^2 - \sin^2(I)}} \right] \quad (3)$$

【0027】このように、平行平板51を形成する光学材料の有する分散($dn(\omega)/d\omega$)により、入射ビームの波長に依存した変位X(ω)が得られる。上述の光学材料SF57で平行平板51を形成する場合、基本波(ω_1)と2倍波($2\omega_1$)との相対位置変位($X(2\omega_1)-X(\omega_1)$)を所要の値である350 μ mにするには、厚さt=36mmの平行平板を入射角がI=53°になるように配置すればよいことになる。なお、入射角I=53°を変えることなく光学材料SF57よりもさらに分散の大きい光学材料を用いると、厚さtをさらに小さくすることができ、よりコンパクトな構成が可能となる。

【0028】ここで、ビーム中心位置調節手段として平行平板51を用いる場合と一对のプリズム24および25を用いる場合とを比較すると、一对のプリズムでは4つの面での屈折を利用することができるのに対して、平行平板では2つの面しか屈折を利用することができない。したがって、同じ長さで同じ光学材料を用いた場合、平行平板よりも一对のプリズムを用いる方がビームの変位量を大きくすることができる。換言すれば、ビーム中心位置調節手段として平行平板よりも一对のプリズムを用いる方が、より短い長さで必要なビーム変位量を得ることができるため、よりコンパクトな構成を実現することができる。

【0029】次に、図2に戻って、第1実施例においてビーム形状整合手段を構成する球面レンズ26の作用を説明する。図2に示すように、第1実施例では、4倍波発生部20の直後であって5倍波発生部21のBBO結晶の入射端面から4.2mmの間隔を隔てた位置に球面レンズ26を配置している。球面レンズ26は、基本波

(波長1064nm)に対してf(ω_1)=40mmの焦点距離を有し、4倍波(波長266nm)に対してf(4 ω_1)=36mmの焦点距離を有する。球面レンズ26では、レンズを形成する光学材料の有する分散および2つの入射ビーム(基本波と4倍波)の広がり角の違いを利用し、各ビームの焦点位置および発散角を調節することにより、5倍波発生部21のBBO結晶の中央において基本波のビーム形状と4倍波のビーム形状とを整合させることができる。

【0030】第1実施例では、4倍波発生部20の射出端に基本波および4倍波のビームウエストがある場合について、したがって4倍波発生部20の射出端での波面の曲率を0とした場合について、ガウシアンビームの伝播をABCDマトリクスを用いて計算することにより、各ビームのビーム径を求めている。図2(a)~(c)に示すように、4倍波発生部20の射出端において直径200 μ mの基本波は、球面レンズ26の後方約47mmの位置すなわち5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置において直径300 μ mのビーム形状に整形される。一方、4倍波発生部20の射出端においてx方向に900 μ mでy方向に200 μ mのビーム形状を有する4倍波は、5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置においてx方向に300 μ mでy方向に100 μ mの楕円ビーム形状に整形される。こうして、5倍波発生部21のBBO結晶の入射端から射出端までの全体に亘って、基本波と4倍波との間に良好なビームの重なりを実現することができる。

【0031】以上のように、第1実施例では、2倍波発生部と4倍波発生部20との間の光路中に配置されたビーム中心位置調節手段の作用により、4倍波発生部20

の射出端における基本波のビーム中心位置と4倍波のビーム中心位置とを、ひいては5倍波発生部21のBBO結晶における基本波のビーム中心位置と4倍波のビーム中心位置とをほぼ一致させている。また、4倍波発生部20と5倍波発生部21との間の光路中に配置されたビーム形状整合手段の作用により、5倍波発生部21のBBO結晶における基本波のビーム形状と4倍波のビーム形状とを整合させている。その結果、ビーム中心位置調節手段とビーム形状整合手段との協働作用により、5倍波発生部21のBBO結晶の入射端から射出端までの全体に亘って、基本波と4倍波との間に良好なビームの重なりを実現することができる。

【0032】このように、第1実施例では、基本波のビーム径を200 μ mと小さく設定しても、4倍波発生部20のBBO結晶におけるウォークオフの影響を補償し、5倍波発生部21のBBO結晶において基本波と4倍波との間に良好なビームの重なりを確保することができる。また、ビーム中心位置調節手段を構成する一対のプリズム24および25（または平行平面板51）およびビーム形状整合手段を構成する球面レンズ26を、2倍波発生部、4倍波発生部20および5倍波発生部21とともに一直線状にコンパクトに配列することができる。こうして、第1実施例によれば、基本波として高ピーク出力のレーザ光を必要とすることなく、波長変換効率が高く且つコンパクトな構成を有する波長変換装置を実現することができる。

【0033】図6は、本発明の第2実施例にかかる波長変換装置の構成を概略的に示す図である。第2実施例は、第1実施例と類似の構成を有する。しかしながら、第1実施例ではビーム形状整合手段として球面レンズを使用しているのに対し、第2実施例ではx方向に正屈折力でy方向に無屈折力のシリンドリカル61とx方向に無屈折力でy方向に正屈折力のシリンドリカル62とを用いている点だけが基本的に相違する。したがって、図6において、図2の第1実施例の構成要素と同様の機能を有する要素には、図2と同じ参照符号を付している。以下、第1実施例との相違点に着目して、第2実施例を説明する。

【0034】図6に示すように、第2実施例では、4倍波発生部20の直後において5倍波発生部21のBBO結晶の入射端面から4.2mmの間隔を隔てて一対のシリンドリカルレンズ61および62を配置している。シリンドリカルレンズ61は、x方向において基本波（波長1064nm）に対して $f_x(\omega_1) = 40$ mmの焦点距離を有し、4倍波（波長266nm）に対して $f_x(4\omega_1) = 36$ mmの焦点距離を有する。一方、シリンドリカルレンズ62は、y方向において基本波（波長1064nm）に対して $f_y(\omega_1) = 20$ mmの焦点距離を有し、4倍波（波長266nm）に対して $f_y(4\omega_1) = 18$ mmの焦点距離を有する。一対のシリ

ンドリカルレンズ61および62では、各ビームの焦点位置および発散角をx方向とy方向とで別々に調節することにより、5倍波発生部21のBBO結晶の中央において基本波のビーム形状と4倍波のビーム形状とを球面レンズよりも良好に整合させることができる。

【0035】図6(a)～(c)に示すように、4倍波発生部20の射出端において直径200 μ mの基本波は、シリンドリカルレンズ62の後方約4.7mmの位置すなわち5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置において直径が約300 μ mのビーム形状に整形される。一方、4倍波発生部20の射出端においてx方向に900 μ mでy方向に200 μ mのビーム形状を有する4倍波も、5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置において直径が約300 μ mのビーム形状に整形される。こうして、第2実施例では、5倍波発生部21のBBO結晶の入射端から射出端までの全体に亘って、基本波と4倍波との間にx方向およびy方向に第1実施例よりも良好なビームの重なりを実現することができる。なお、第2実施例において、第1実施例の変形例のように、ビーム中心位置調節手段として平行平面板を用いることができる。

【0036】図7は、本発明の第3実施例にかかる波長変換装置の構成を概略的に示す図である。第3実施例は、第1実施例や第2実施例と類似の構成を有する。しかしながら、第1実施例ではビーム中心位置調節手段として一対のプリズムを使用しビーム形状整合手段として球面レンズを使用しているのに対し、第3実施例ではビーム中心位置調節手段およびビーム形状整合手段として一対の回折レンズ71および72を用いている点だけが基本的に相違する。したがって、図7において、図2の第1実施例の構成要素と同様の機能を有する要素には、図2と同じ参照符号を付している。以下、第1実施例との相違点に着目して、第3実施例を説明する。

【0037】図7に示すように、第3実施例では、第1の回折レンズ71が4倍波発生部20の射出端から60mmの間隔を隔てて配置され、第2の回折レンズ72が第1の回折レンズ71から120mmの間隔を隔てて且つ5倍波発生部21の入射端から53mmの間隔を隔てて配置されている。なお、一対の回折レンズ71および72の中心は、4倍波のビーム中心軸線と一致するように位置決めされている。そして、第1の回折レンズ71は、基本波（波長1064nm）に対して $f(\omega_1) = 40$ mmの焦点距離を有し、4倍波（波長266nm）に対して $f(4\omega_1) = 160$ mmの焦点距離を有する。一方、第2の回折レンズ72は、基本波（波長1064nm）に対して $f(\omega_1) = 40$ mmの焦点距離を有し、4倍波（波長266nm）に対して $f(4\omega_1) = 160$ mmの焦点距離を有する。

【0038】このように、回折レンズ（ゾーンプレート：zone plate）は、その焦点距離が入射ビームの波長

の逆数に比例すなわち入射ビームの周波数に比例する回折光学素子である。したがって、基本波（波長1064 nm）に対する焦点距離 $f(\omega_1)$ と4倍波（波長266 nm）に対する焦点距離 $f(4\omega_1)$ との間には、 $4f(\omega_1) = f(4\omega_1)$ の関係が成立する。なお、開口数NAは、開口径 D_0 を用いて、 $NA = D_0 / (2f)$ と与えられる。したがって、同一口径の基本波（波長1064 nm）に対する開口数 $NA(\omega_1)$ と4倍波（波長266 nm）に対する開口数 $NA(4\omega_1)$ との間には、 $NA(\omega_1) = 4NA(4\omega_1)$ の関係が成立する。一方、焦点でのスポットサイズ d は、光の波長を λ として、 $d = \lambda / NA \propto 1 / (\omega \cdot NA)$ となる。したがって、同一口径の基本波（波長1064 nm）のスポットサイズ $d(\omega_1)$ と4倍波（波長266 nm）のスポットサイズ $d(4\omega_1)$ とが等しくなり、 $d(\omega_1) = d(4\omega_1)$ の関係が成立するという特徴を有する。

【0039】さらに、2つの回折レンズ71と72との間の距離を調節することにより、この一对の回折レンズの後側焦点位置の調節を行い、基本波に対する後側焦点位置を5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置に一致させるとともに、4倍波に対する後側焦点位置を5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置よりも所定距離だけ4倍波発生部側に設定することができる。その結果、一对の回折レンズ71および72は、基本波のビーム形状と4倍波のビーム形状とを基本波の焦点付近で整合させる。回折レンズ71に垂直入射したビームは、回折レンズ71上での入射位置に依存することなく、光軸上の焦点（5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置）に集められる。このため、回折レンズ71の中心からずれて入射した基本波のビーム中心位置は、5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置における光軸上で4倍波のビーム中心位置とほぼ一致する。このように、一对の回折レンズ71および72は、5倍波発生部21のBBO結晶におけるビーム中心位置調節手段の機能とビーム形状整合手段の機能とを同時に果たすことができる。

【0040】したがって、図7(a)～(c)に示すように、4倍波発生部20の射出端において4倍波のビーム中心軸線から350 μ mだけ偏心した直径200 μ mの基本波は、第2の回折レンズ72の後方約58mmの位置すなわち5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置において4倍波のビーム中心軸線を中心として直径が約180 μ mのビーム形状に整形される。一方、4倍波発生部20の射出端においてx方向に900 μ mでy方向に200 μ mのビーム形状を有する4倍波も、5倍波発生部21のBBO結晶の中央位置において4倍波のビーム中心軸線を中心として直径が約180 μ mのビーム形状に整形される。こうして、第3実施例では、5倍波発生部21のBBO結晶の入射端から射出端までの全体に亘って、基本波と4倍波との間に良好なビームの重なり

を実現することができる。

【0041】なお、上述の第1実施例および第2実施例では、2倍波発生部と4倍波発生部20との間の光路中にビーム中心位置調節手段としての一对のプリズムまたは平行平面板を配置しているが、4倍波発生部20と5倍波発生部21との間の光路中にビーム中心位置調節手段を配置してもよい。ただし、この場合には、4倍波発生部20で発生した波長の短いビーム（たとえば紫外ビーム）がビーム中心位置調節手段を透過することになるので、光の吸収が問題とならないような光学材料を選択しなければならない。換言すれば、ビーム中心位置調節手段を2倍波発生部と4倍波発生部20との間の光路中に配置する方が、使用する光学材料の選択の幅が大きくなるという利点を有する。

【0042】また、第2実施例では、ビーム形状整合手段として一对のシリンドリカルレンズを用いているが、x方向とy方向とで屈折力の異なる非球面レンズを使用することもできる。さらに、上述の各実施例では、4倍波発生部20において結晶軸を反転させた一对のBBO結晶を用いているが、1つのBBO結晶で4倍波発生部20を構成しても本発明が成立することは明らかである。また、上述の各実施例では、5倍波発生用の波長変換装置を例にとって本発明を説明しているが、本発明は、5倍波発生用の波長変換装置に限定されることなく、周波数 ω_1 のレーザ光と周波数 ω_2 のレーザ光とに基づいて周波数 $(\omega_1 + 2\omega_2)$ のレーザ光を発生させる波長変換装置に対して一般的に適用が可能である。

【0043】図8は、本発明の波長変換装置を用いた紫外レーザ装置にかかる一実施例の構成を概略的に示す斜視図である。本実施例は、本出願人の出願にかかる特開平8-334803号公報に開示された波長変換装置に本発明の装置を適用した例である。図8に示すように、本実施例の紫外レーザ装置80は、並列的に縦横配置された100個のレーザユニット83を備えている。各レーザユニット83は、半導体レーザ励起固体レーザ装置81と、該レーザ装置81からの発振レーザ光を紫外レーザ光に波長変換するための波長変換装置82とを有する。波長変換装置82として、たとえば上述の第1実施例～第3実施例にかかる波長変換装置を使用することができる。

【0044】本実施例では、半導体レーザ励起固体レーザ装置81の固体レーザ媒質として、例えばNd:YAGを用いることができる。この場合、レーザ媒質（すなわちNd:YAG）の吸収スペクトルに応じて約808 nmの励起光を供給するレーザダイオードを使用し、半導体レーザ励起固体レーザ装置81から1064 nmの波長を有するレーザ光を発振させることができる。半導体レーザ励起固体レーザ装置81から発振された1064 nmの近赤外レーザ光は、たとえば5倍波発生作用を有する波長変換装置82を介して波長変換され、213

nmの波長を有する紫外レーザー光となって各レーザーユニット83から出力される。各レーザーユニット83から出力された紫外レーザー光は、図示を省略した光結合手段によって、同じ光路に沿って（同軸に）結合される。

【0045】本実施例の紫外レーザー装置80では、各レーザーユニット83からの紫外レーザー光の出力が小さくても、並列的に配置された所要数（本実施例では100個）のレーザーユニット83から出力された紫外レーザー光を光結合させているので、最終的に得られる紫外レーザー光の出力を高くすることができる。また、本実施例の紫外レーザー装置80では、並列的に配置された複数のレーザーユニット83から出力された紫外レーザー光を光結合させているので、最終的に得られる紫外レーザー光のコヒーレンスを低くすることができる。その結果、本実施例では、たとえば半導体露光装置の光源として十分な出力と低コヒーレンスを備えた紫外レーザー装置を実現することができる。

【0046】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の波長変換装置によれば、基本波のビーム径を小さく設定しても、ビーム中心位置調節手段およびビーム形状整合手段の作用により、4倍波発生部のBBO結晶におけるウォークオフの影響を補償し、5倍波発生部のBBO結晶において基本波と4倍波との間に良好なビームの重なりを確保することができる。また、ビーム中心位置調節手段およびビーム形状整合手段を、2倍波発生部、4倍波発生部および5倍波発生部とともに一直線状にコンパクトに配列することができる。したがって、本発明によれば、基本波として高ピーク出力のレーザー光を必要とすることなく、波長変換効率が高く且つコンパクトな構成を有する波長変換装置を実現することができる。

【0047】また、たとえば半導体レーザー励起固体レーザー装置と本発明の波長変換装置とを有するレーザーユニットを並列的に複数配置することによって、紫外レーザー装置を構成することができる。この場合、各レーザーユニットから出力された紫外レーザー光を光結合させると、最終的に得られる紫外レーザー光の出力を高くするとともにコヒーレンスを低くすることができる。その結果、本発明の紫外レーザー装置は、たとえば半導体露光装置の光源として十分な出力と低コヒーレンスを備えた紫外レーザー光を供給することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の波長変換装置の作用を説明するための図であって、（a）は各レーザー光が装置を伝播する様子を、（b）は4倍波発生部の射出端における基本波と4

倍波との重なりを、（c）は5倍波発生部のBBO結晶における基本波と4倍波との重なりをそれぞれ示している。

【図2】本発明の第1実施例にかかる波長変換装置の構成を概略的に示す図である。

【図3】第1実施例の4倍波発生部20におけるウォークオフの影響を説明するための図である。

【図4】第1実施例においてビーム中心位置調節手段を構成する一対のプリズム24および25の作用を説明するための図である。

【図5】第1実施例におけるビーム中心位置調節手段として平行平板を用いた変形例を説明するための図である。

【図6】本発明の第2実施例にかかる波長変換装置の構成を概略的に示す図である。

【図7】本発明の第3実施例にかかる波長変換装置の構成を概略的に示す図である。

【図8】本発明の波長変換装置を用いた紫外レーザー装置にかかる一実施例の構成を概略的に示す斜視図である。

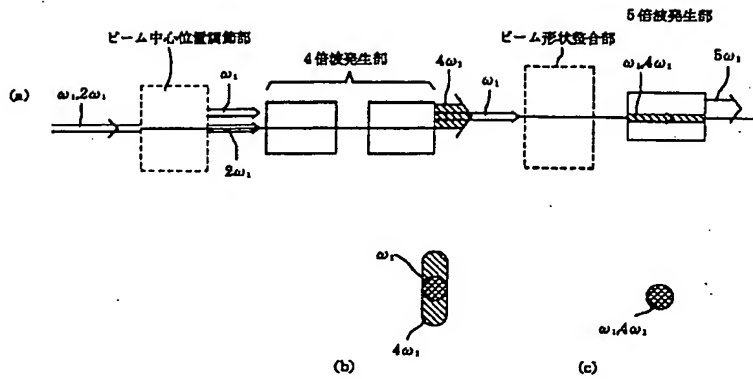
【図9】従来の波長変換装置の4倍波発生部を構成する非線形光学結晶BBOにおける4倍波発生の様子を示す図であって、（a）は各レーザー光がBBO結晶を伝播する様子を、（b）はBBO結晶の射出端における各レーザー光のビーム位置およびビーム形状をそれぞれ示している。

【図10】従来の波長変換装置において結晶軸を反転させた一対のBBO結晶を直列配置して4倍波発生部を構成した様子を示す図であって、（a）は各レーザー光が一対のBBO結晶を伝播する様子を、（b）は後段のBBO結晶の射出端における各レーザー光のビーム位置およびビーム形状をそれぞれ示している。

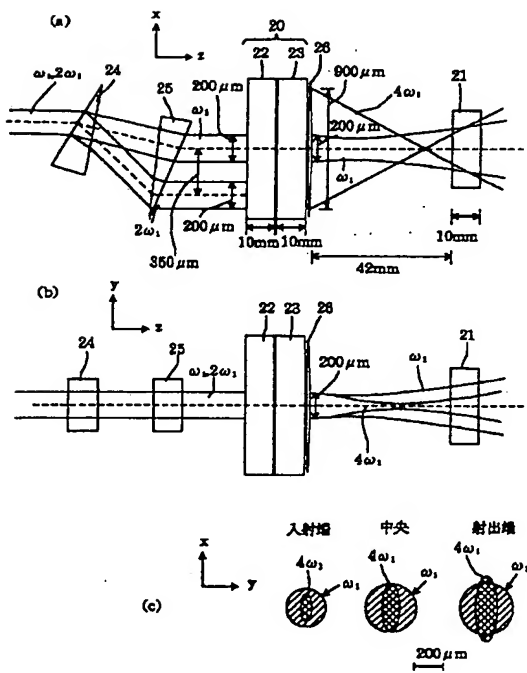
【符号の説明】

20	4倍波発生部
21	5倍波発生部
22、23	BBO結晶
24、25	プリズム
26	球面レンズ
51	平行平板
61、62	シリンダリカルレンズ
71、72	回折レンズ
80	紫外レーザー装置
81	半導体レーザー励起固体レーザー装置
82	波長変換装置
83	レーザーユニット

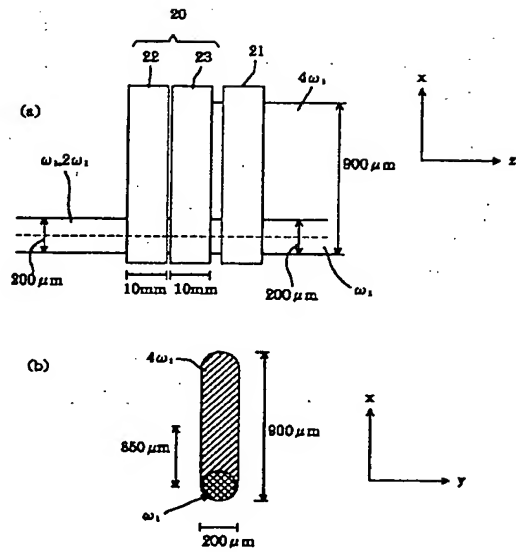
【図1】



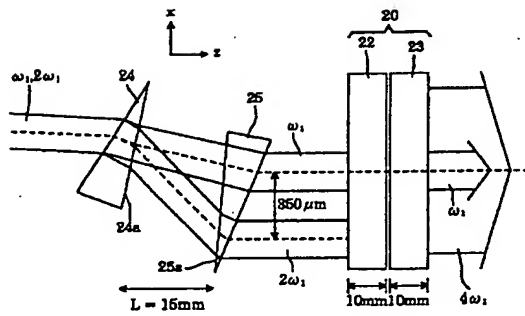
【図2】



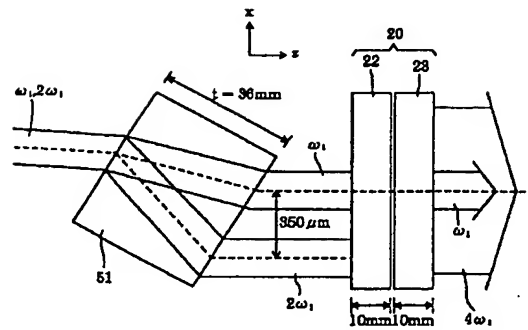
【図3】



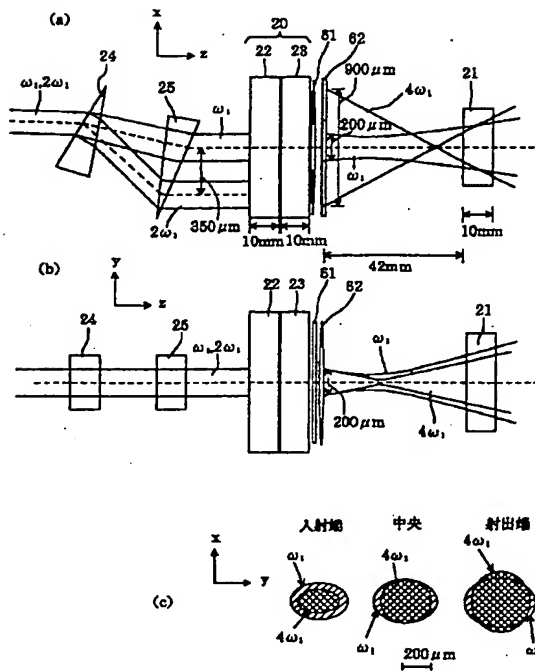
【図4】



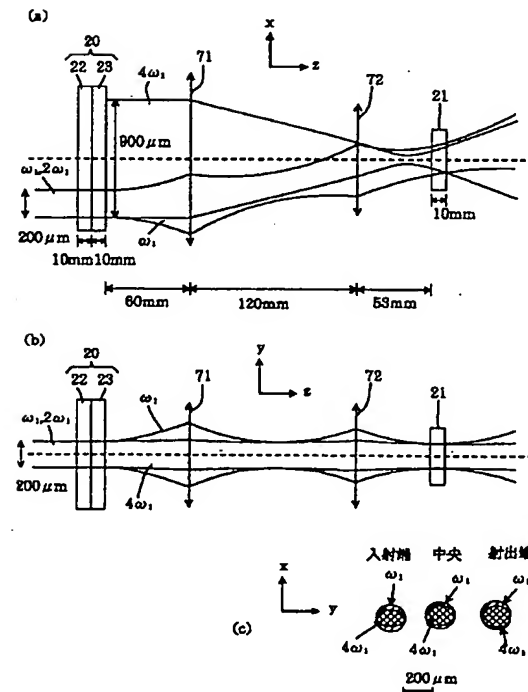
【図5】



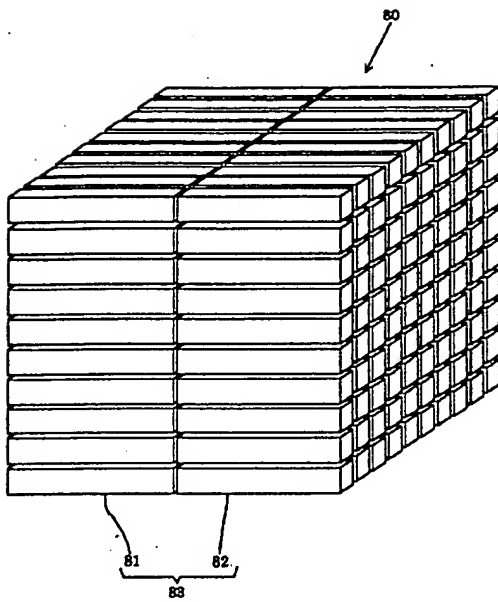
【図6】



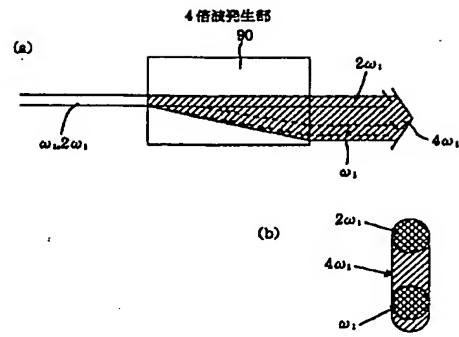
【図7】



【図8】



【図9】



【図10】

